

## **CÓDIGO 2.3.15**

### **PERMEABILIDAD DE HORMIGÓN RECICLADO ESTRUCTURAL**

**C. Thomas\*, J. Setién, J.A. Polanco, A.I. Cimentada**

Dpto. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. Avda. Los Castros s/n, Santander, 39005 España.  
Email: carlos.thomas@unican.es

**PALABRAS CLAVE:** reciclaje, durabilidad, microestructura, propiedades mecánicas, propiedades físicas, hormigón reciclado, concreto de agregado reciclado.

#### **RESUMEN**

En este trabajo se presentan los principales resultados obtenidos de una serie de investigaciones encaminadas a analizar las propiedades de durabilidad del hormigón estructural incorporando áridos reciclados de hormigón. Uno de los aspectos más desconocidos de los hormigones reciclados está relacionado con su durabilidad. La mayoría de los resultados encontrados en la literatura no son comparables entre sí debido a la heterogeneidad de los áridos reciclados, distintas relaciones agua/cemento, los tipos de cemento utilizados, etc. En esta investigación, se han comparado las características de 24 distintas dosificaciones de hormigón con sustitución parcial y total de árido reciclado. Se han analizado las propiedades físicas y mecánicas y la permeabilidad al agua y al oxígeno como indicadores de la durabilidad. La durabilidad de los hormigones fabricados con árido reciclado es menor a la de los hormigones de control debido a la alta porosidad que el árido reciclado introduce en el hormigón y que puede ser el origen de ciertos daños en la estructura. Estas pérdidas de durabilidad disminuyen para bajas relaciones agua/cemento. Sin embargo, tras el análisis mecánico se observa que la influencia del árido reciclado es menor para las altas relaciones agua/cemento.

#### **1. INTRODUCCIÓN**

Un gran número de investigaciones han sido llevadas a cabo para encontrar maneras de utilizar árido reciclado en la fabricación de hormigón y, en particular, se ha analizado ampliamente el uso de áridos reciclados de hormigón (RA). Las propiedades del RA hacen que éste sea apropiado para la producción de nuevos hormigones: hormigones reciclados (RAC) [1]. En general, se acepta que hay una cierta pérdida de características en las propiedades físicas y mecánicas. Sin embargo, la mayor parte de los resultados encontrados en la bibliografía no son comparables entre sí debido a la heterogeneidad de los distintos áridos reciclados utilizados, distintas relaciones agua/cemento ( $w/c$ ) y tipos de cemento usados. Dada la alta absorción de los RA, el RAC requiere más agua para obtener la misma trabajabilidad que el hormigón de control correspondiente. La densidad, la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de RAC son relativamente más bajos que los de los hormigones de control. Además, para una relación  $w/c$  dada, la permeabilidad, la tasa de carbonatación y el riesgo de corrosión de la armadura son más altos.

La presente investigación forma parte de un estudio prenормativo [2-13] que se realizó en España con el objetivo de definir las características del árido reciclado y el hormigón reciclado que recogería la EHE en su revisión del año 2008. Estos resultados se reunieron en el Anexo 15 "Recomendaciones para la utilización de árido reciclado de hormigón" de la Instrucción de Hormigón Estructural española (EHE- 08) [3]. Este anexo sólo permite el uso de áridos reciclados grueso obtenido a partir de residuos de hormigón,

recomendando su uso con un límite máximo del 20% en peso de sustitución del árido grueso total del hormigón. En esta proporción, las propiedades de durabilidad del RAC se verán afectadas en baja medida. Ahora bien, si el hormigón va a estar sometido a ambientes agresivos, deberán llevarse a cabo análisis específicos, debido a los aspectos aún desconocidos acerca de la durabilidad del RAC.

Han sido estudiadas las propiedades físicas (densidad y absorción de agua), propiedades mecánicas (resistencia a la compresión y tracción indirecta) y la durabilidad (penetración de agua bajo presión y permeabilidad al oxígeno) de los hormigones con 0 %, 20 %, 50 % y 100 % de sustitución de áridos gruesos por áridos reciclados y diferentes relaciones w/c.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiales y dosificaciones

Se han estudiado un total de 24 dosificaciones [4]. Seis hormigones de control (CC) con áridos naturales calizos (NA) y sustituciones del 20%, 50% y 100% de NA grueso por RA obtenido a partir de residuos de construcción y demolición (RCDs).

La Instrucción española del Hormigón Estructural (EHE-08) establece los requisitos de diseño de mezcla para los diferentes tipos de exposición que pueden causar corrosión de la armadura en el hormigón. Los mismos se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Diseños de hormigón armado para la prevención de la corrosión según la clase o ambiente.

Ambiente (EHE):	I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV
Ambiente (EN 206-1):	X0	XC		XS1	XS2	XS3	XD
Relación w/c máxima	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50
Mínimo de cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	250	275	300	300	325	350	325

El estudio se llevó a cabo en tres fases experimentales:

- Fase 1: dosificaciones con w/c = 0,65 (H-0.65) y w/c = 0,50 (H-0.50), utilizando los áridos secos.
- Fase 2: dosificaciones con w/c = 0,65 (H-0.65AS) y w/c = 0,50 (H-0.50AS), con áridos gruesos saturados (natural y reciclado).
- Fase 3: dosificaciones con w/c = 0,55 (H-0.55ARS) y w/c = 0,45 (H-0.45ARS), con áridos reciclados saturados.

Las dosificaciones para los H-0.65 y H-0.50 (fase 1), H-0.65AS y H-0.50AS (fase 2) y H-0.55ARS y H-0.45ARS (fase 3) se recogen en [4]. La relación w/c efectiva ha sido calculada teniendo en cuenta una absorción de 70% de la capacidad total de los áridos y, cuando se utilizaron áridos saturados, calculando la diferencia entre el peso después y antes del proceso de saturación.

Fueron fabricadas y curados en una atmósfera controlada estándar de  $20 \pm 5$  ° C y  $97 \pm 2\%$  de humedad un total de 768 probetas cilíndricas (150x300 mm) [13].

## 2.2. Propiedades físicas

La densidad y la capacidad de absorción de agua del hormigón endurecido se determinaron mediante la evaluación del volumen de poro abierto después de haber sido saturado previamente, obteniéndose el volumen aparente y relativo de las muestras y relacionando éstos con los pesos de las mismas.

## 2.3. Propiedades mecánicas

Se utilizó una prensa servo-hidráulica universal de carga máxima de 1500 kN para la realización de los ensayos de caracterización mecánica. La velocidad de aplicación de carga fue de 8 kN/s para la tracción y 10 kN/s para la resistencia a la compresión.

## 2.4. Durabilidad

Se han ensayado tres probetas cilíndricas para la determinación de la penetración máxima de agua bajo presión. En este ensayo, una columna de agua actúa durante 72 horas sobre la muestra con una presión de 5 bares, lo que equivale a mantener las muestras a una profundidad de 50 m bajo agua. Como complemento al análisis de la durabilidad se ha determinado la permeabilidad al oxígeno de los hormigones endurecidos.

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Densidad relativa

La Figura 1 muestra la correlación entre la densidad relativa de los RAC y CC frente a la relación w/c efectiva de los mismos.

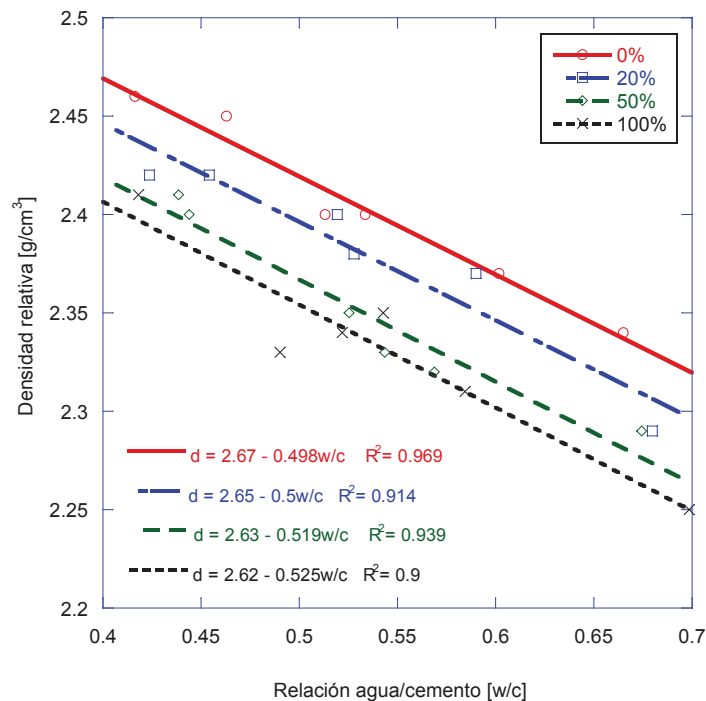


Figura 1. Densidad relativa frente a la relación agua/cemento.

La densidad relativa de los CC y RAC, con 28 días de edad, disminuye linealmente con la relación w/c. Todos los diferentes grados de sustitución presentan un comportamiento similar. La pérdida se sitúa alrededor de 3%, lo que confirma que el RA utilizado es de una calidad alta.

### 3.2. Coeficiente de absorción

La Figura 2 muestra la correlación entre el coeficiente de absorción de los CC y RAC frente a la relación w/c efectiva.

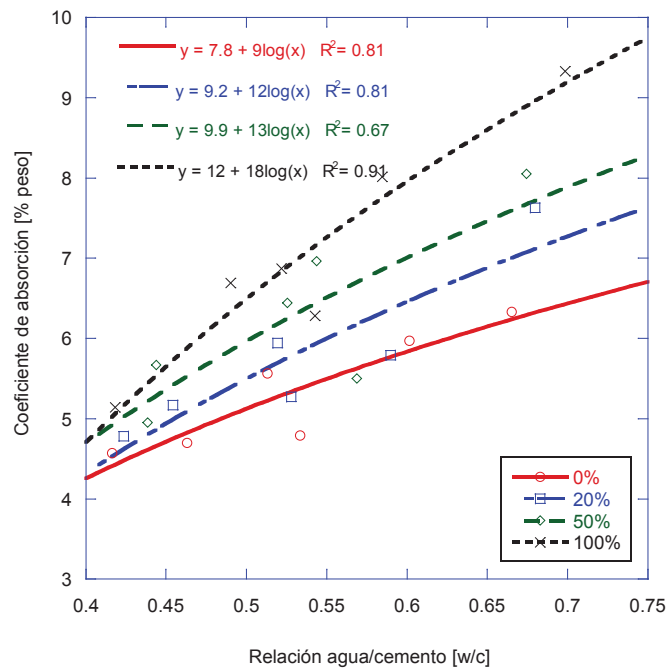


Figura 2. Absorción frente a la relación agua/cemento.

El coeficiente de absorción aumenta con la relación w/c y el grado de sustitución. La absorción de un RAC con 100 % de sustitución y una relación w/c de 0,65 aumenta de un 6,2 % a un 8,4 % con respecto del CC. Esta cantidad representa un aumento del 35 % en la absorción. De estos resultados se deduce que el árido grueso reciclado tiene una marcada influencia sobre esta característica del hormigón.

### 3.3. Resistencia a compresión

Es habitual relacionar la resistencia a compresión y/o resistencia a la tracción con la relación w/c. En el caso que nos ocupa, esto es particularmente importante ya que las relaciones w/c efectivas pueden variar con respecto a las teóricamente diseñadas.

La Figura 3 muestra la correlación entre la resistencia a la compresión de los RAC y CC y la relación w/c efectiva.

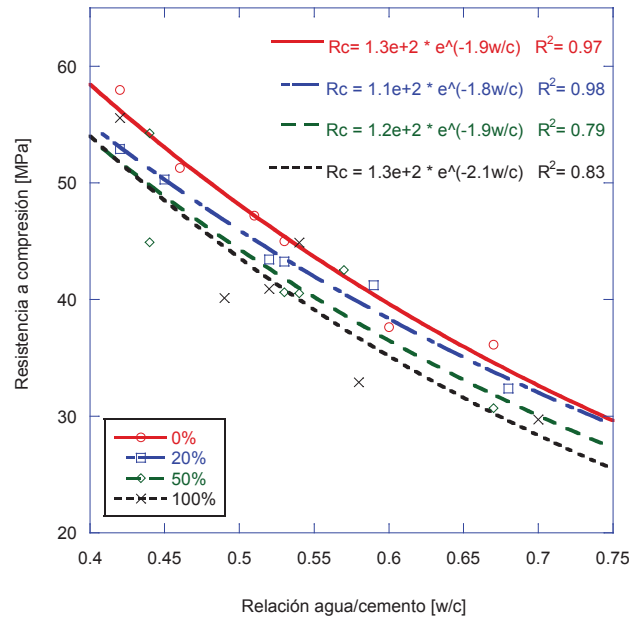


Figura 3. Resistencia a compresión frente a la relación agua/cemento.

A los 28 días de curado de los hormigones, los resultados muestran que el uso de un 20 % de RA no produce cambios significativos con respecto a la resistencia a compresión del CC correspondiente. Cuando la sustitución es del 100 % se observa una pérdida significativa de la resistencia a la compresión. Cuando la sustitución es total, asegurar niveles similares de resistencia supone reducir la relación w/c en 0,05 [12].

### 3.4. Profundidad de penetración de agua bajo presión

La Figura 4 muestra la profundidad de penetración del agua frente a la relación w/c de los CC y RAC con diferentes grados de sustitución.

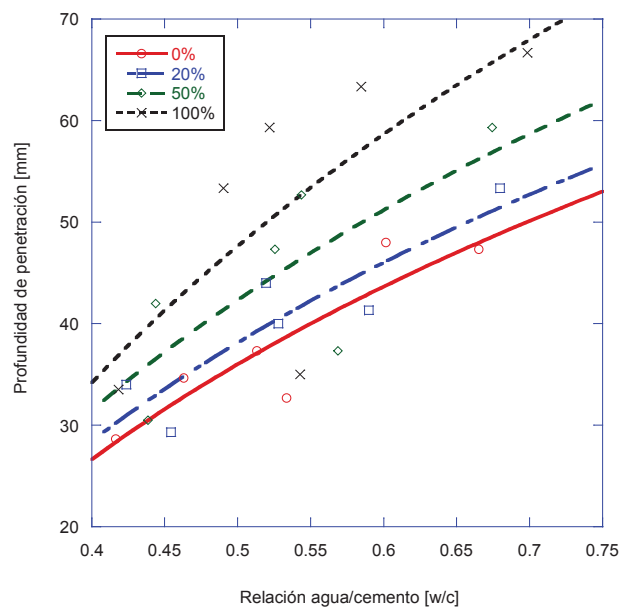


Figura 4. Penetración de agua bajo presión frente a la relación agua/cemento.

La permeabilidad al agua aumenta con la relación w/c efectiva y con el porcentaje de AR incorporado. La dispersión de estos valores es significativa, pero la tendencia del hormigón es a reducir la permeabilidad, independientemente del grado de sustitución, cuando se reducen las relaciones w/c. Se observa que las curvas tienden a converger en valores de penetración de agua de alrededor de 30 mm y relación w/c de menos de 0,45. En estas condiciones, se puede confirmar que las diferencias observadas entre CC y el RAC son mínimas. No obstante, la profundidad máxima registrada se relaciona con el grado de incorporación de la AR de forma logarítmica.

### 3.5. Permeabilidad al oxígeno

La Figura 5 muestra la permeabilidad al oxígeno frente a la relación w/c efectiva de los CC y RAC con diferentes grados de sustitución.

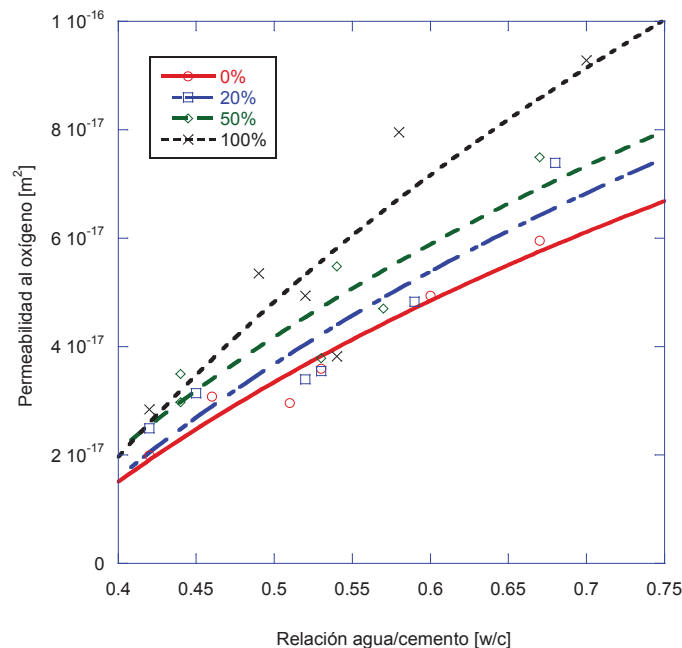


Figura 5. Permeabilidad al oxígeno frente a la relación agua/cemento.

Nuevamente se observa una tendencia de las curvas a converger cuando las relaciones w/c son bajas. Cuando las relaciones w/c son bajas, la propia pasta de cemento, muy cerrada, ejerce un efecto aislante sobre la porosidad de los AR a pesar de que su porosidad es notablemente mayor.

Además, debido a los excelentes parámetros de ajuste obtenidos, se puede decir que la permeabilidad al oxígeno es un indicador adecuado para la evaluación de la naturaleza porosa o capilar del material y por lo tanto de su comportamiento frente a la durabilidad [13].

## 4. CONCLUSIONES

Las densidades de los hormigones de árido reciclado hechos con árido reciclado insaturados son inferiores a las del hormigón de control a pesar de la reducción en la relación agua/cemento. Además, este efecto aísla la mayor porosidad de estos agregados. En el caso del hormigón con la misma relación agua/cemento efectiva, la densidad disminuye con la incorporación de árido reciclado. Una adición de 20 % de árido

reciclado proporciona valores de densidad de alrededor de 5 % menor que en el caso del hormigón de control.

La permeabilidad al oxígeno presenta un mejor ajuste con la relación agua/cemento que la permeabilidad al agua. La durabilidad de RAC, con la misma relación agua/cemento, es inferior a la del hormigón convencional debido a la mayor porosidad de los agregados reciclados. Sin embargo, en hormigones de baja relación agua/cemento, la baja porosidad de la nueva pasta es predominante por lo que el avance de los agentes agresivos se retrasa, obteniéndose un comportamiento similar para el control y hormigones reciclados.

Desde un punto de vista conservador, y de acuerdo con el estudio llevado a cabo en la profundidad de penetración de agua y la porosidad, parece recomendable que disminuya en 0,1 puntos de la relación agua/cemento máxima requerida para hormigones con 100 % de los agregados reciclados gruesos, en comparación con los hormigones convencionales. Este requisito se aplicaría a todos los tipos de exposición agresivos generales.

Los comportamientos observados, en términos de las propiedades física, durabilidad y mecánicas de los hormigones curados en una habitación húmeda y un medio ambiente marino atmosférica difieren en cierto grado, dependiendo del parámetro analizado. Sin embargo, la evolución y el efecto producido por la RA son proporcionales en los dos casos.

### **Agradecimientos**

Los autores desean agradecer al Ministerio de Medio Ambiente español la financiación de la investigación.

Los resultados contenidos en este documento se han obtenido en el marco del Proyecto RECNHOR (financiado por el Ministerio de Medio Ambiente español) y en el Proyecto CLEAM (financiado por el Centro Español para el Desarrollo Tecnológico Industrial, CDTI ), dirigido por la Agrupación de Interés Económico CLEAM - CENIT, AIE ( Acciona, Dragados, Ferrovial, FCC, Isolux, OHL y Sacyr ) y las PYME Informatica 68, Quilosa y Martínez Segovia y asociados.

### **Referencias**

- [1] de Juan MS, Gutiérrez PA. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Constr.Build.Mater. 2009;23(2):872-7.
- [2] Thomas C, Setián J, Polanco JA. Determinación de la macroporosidad accesible y no accesible mediante análisis digital de imágenes en hormigones reciclados de aplicación estructural. X Congreso Nacional de Materiales 2008;II:923-6.
- [3] Ministerio de Fomento. “Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)”. 2008.
- [4] Alaejos P, Sánchez M, Martínez F, González B, Vázquez E, Barra M, et al. Estudio Prenormativo sobre la utilización de los RCD's en hormigón reciclado de aplicación estructural (Proyecto RECNHOR) y Reciclado de los RCD's como áridos de hormigones estructurales (Proyecto CLEAM). IECA – Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones; 2011.
- [5] E. Dapena, P. Alaejos, A. Lobet, D. Pérez. Effect of the recycled sand content on the characteristics of mortars and concretes. J Mater Civil Eng, 23 (4) (2010), pp. 414–422
- [6] CEDEX - Ministerio de Fomento. Informe “Reciclado de RCDs como áridos de hormigones no estructurales”, para el Proyecto CENIT CLEAM. 2009.

- [7] Thomas C, Cimentada A, Setién J, Polanco JA, Rico J, Sosa I. Waste with sulfur from tested concrete specimens as aggregate for structural recycled concrete. In: WASTES: solutions, treatments and opportunities 1st international conference, vol. 1(1); 2011. p. 211.
- [8] Thomas C, Sosa I, Setién J, Polanco JA, Medina C. Construction and demolition wastes as aggregate for recycled concrete under marine environments. In: WASTES: solutions, treatments and opportunities 1st international conference, vol. 1(1); 2011. p. 183–9.
- [9] Thomas C, Sosa I, Setién J, Polanco JA, Lombillo I. Mechanical behavior of recycled aggregates from concrete waste. In: WASTES: solutions, treatments and opportunities 1st international conference, vol. 1(1); 2011. p. 205–11.
- [10] Thomas C, Polanco JA, Setién J, Lombillo I. Durabilidad en ambiente marino de hormigón con incorporación de áridos reciclados procedentes de la trituración de hormigón. XI Congreso Nacional de Materiales 2010.
- [11] Etxeberria M, Vazquez E, Mari A, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem.Concr.Res.* 2007 MAY;37(5):735-42.
- [12] C. Thomas, A. Cimentada, J.A. Polanco, J. Setién, D. Méndez, J. Rico, Influence of recycled aggregates containing sulphur on properties of recycled aggregate mortar and concrete, *Composites Part B: Engineering*, Volume 45, Issue 1, February 2013, Pages 474-485, ISSN 1359-8368,
- [13] Thomas, C., Setién, J., Polanco, J.A., Alaejos, P., Sánchez De Juan, M. Durability of recycled aggregate concrete (2013) *Construction and Building Materials*, 40, pp. 1054-1065.